

Großflächige Simulation von Verkehrsmanagementansätzen zur Reduktion von Schadstoffemissionen

Daniel Krajzewicz¹, Nikolaus Furian², Josep Tomàs Vergés³

^{1,3} Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrssystemtechnik,
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, Deutschland

² Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Inffeldgasse 19, A-8010 Graz, Österreich

1 Einleitung

Einer der größten Nachteile des derzeitigen motorisierten Verkehrs ist die Belastung der Umwelt mit Schadstoffemissionen sowie der Verbrauch fossiler Energien. Die Reduktion dieser Belastungen liegt im Aufgabengebiet verschiedener Akteure, oft durch entsprechende Gesetzgebung geregelt. So fordert die europäische Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft [1] ein Handeln der Verantwortlichen bei der Überschreitung vorgegebener Grenzwerte bestimmter Schadstoffe. In Deutschland ist dabei zumeist das lokale Verkehrsmanagement für die Einführung entsprechender Maßnahmen zur Reduktion verkehrlicher Emissionen zuständig.

Eine umfangreiche Quelle für Maßnahmen des Verkehrsmanagements zur Luftreinhaltung an Verkehrswegen ist die Datenbankanwendung „MARLIS“ [2], die von der Firma AVISO GmbH im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) erstellt worden ist und kostenlos über die Internetseiten der BASt bestellt werden kann. Neben anderen Attributen, die zum Teil in Kapitel 3.1 erläutert werden, werden die in ihr enthaltenen Maßnahmen durch eine ordinal skalierte Wirkung beschrieben. Es zeigt sich, dass „... für einen großen Teil der Maßnahmen sowohl für NO₂ (45%) als auch für PM₁₀ (43%) höchstens ein geringes Wirkungspotential erwartet [wird], für weitere 53% bzw. 56% liegt die erwartete Wirkungsstufe in der Spannbreite von gering bis hoch.“, [3, Seite 4].

Die im Folgenden wiedergegebenen Untersuchungen gehen der Frage nach, welche Auswirkungen Maßnahmen des Verkehrsmanagements auf das Verkehrsgeschehen und somit auf die durch den Verkehr erzeugten Emissionen haben. Die Untersuchungen werden mit Hilfe von Simulationen durchgeführt. Diese haben den Vorteil, unterschiedliche Eingriffe in das Verkehrsgeschehen untersuchen zu können, ohne dieses direkt zu beeinflussen. Das

¹ Korrespondierender Autor: Daniel.Krajzewicz@dlr.de, www.dlr.de/ts

² Furian@ivt.tugraz.at

³ josep.tomas.ver@gmail.com

langfristige Ziel ist die Unterstützung bei der Auswahl einer geeigneten Maßnahme für ein gegebenes Gebiet.

Die hier vorgestellten Arbeiten (siehe auch [4]) konzentrierten sich auf die Auswahl von Verkehrsmanagementmaßnahmen und ihre Umsetzung innerhalb der benutzten Simulationsumgebung. Im Ergebnis sind drei großflächige Änderungen in der Verkehrsinfrastruktur umgesetzt worden: die Reduktion der maximal erlaubten Geschwindigkeit auf allen Straßen in „bewohnten Gebieten“ und eine permissive sowie eine restriktive Umweltzone. Das Ausgangsszenario bildet hierbei den Wochentagstyp „Dienstag-Donnerstag“ in der Stadt Braunschweig ab.

Der Bericht ist wie folgt gegliedert: in Kapitel 2 werden zunächst das benutzte Simulationssystem sowie das benutzte Szenario vorgestellt. Die Auswahl sowie die Umsetzung der Maßnahmen werden in Kapitel 3 beschrieben. Kapitel 4 präsentiert die Ergebnisse der Simulationen. Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung.

2 Simulationssystem

2.1 Verkehrsflusssimulation SUMO

Für die Simulation wurde das Programmpaket SUMO benutzt. SUMO [5], [6] ist eine quelloffene, multi-modale und mikroskopische Verkehrsflusssimulation, die seit 2002 vom Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt zur Verfügung gestellt wird. Neben der Simulation selbst beinhaltet das Paket „SUMO“ weitere Applikationen für die Aufbereitung des Simulationsnetzes sowie der Verkehrsnachfrage.

SUMO ist für die Simulation großer Straßennetze ausgelegt. Obwohl verschiedene Fahrzeugfolgemodelle ausgewählt werden können, wird zumeist und auch im Folgenden das voreingestellte Modell von Krauß [7] benutzt. Die Spurwahl sowie die Befolgung von Vorfahrtsregeln werden über Modelle abgebildet, die in [8] respektive in [9] beschrieben sind.

SUMO wurde und wird innerhalb einer Vielzahl nationaler und internationaler Projekte benutzt und erfreut sich einer wachsenden Akzeptanz im akademischen Umfeld, wobei es hauptsächlich im Bereich der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation eingesetzt wird.

2.2 Emissionsmodell PHEMlight

Innerhalb des Projektes COLOMBO [10], [11] wurde SUMO um ein neues Emissionsmodell erweitert, PHEMlight [12]. PHEMlight basiert auf dem Emissionsmodell PHEM der Technischen Universität Graz [13], [14]. Während PHEM als eine eigenständige Applikation ausgeliefert wird, die Emissionen für eine vom Nutzer vorgegebene Fahrzeugpopulation aus eingelesenen Geschwindigkeitsverläufen errechnet, ist PHEMlight direkt in SUMO eingebettet.

PHEMlight berechnet zunächst die vom simulierten Fahrzeug aufgebrachte Kraft und nutzt diese um die entsprechende Emissionsmenge aus zuvor mit PHEM erstellten Kennlinien zu bestimmen. PHEMlight bildet PKWs, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), Linien- und Reisebusse (LB, RB), Last- und Sattelzüge (LSZ) sowie Solo LKWs ab. Leichte Nutzfahrzeuge wurden in drei Gewichtsklassen unterteilt, Solo LKWs in zwei. Des Weiteren berücksichtigt PHEMlight verschiedene Schadstoffklassen (EU0-EU6) und verschiedene Treibstoffe (Diesel und Benzin).

PHEMlight nutzt sogenannte CEP (**C**haracteristic **E**missions over **P**ower)-Datensätze für alle implementierten Klassen. Diese beinhalten generelle Informationen über ein durchschnittliches Fahrzeug dieser Klasse, wie z.B. Nennleistung oder Leergewicht, sowie Emissionskurven (für alle gängigen Schadstoffe und Verbrauch) über Leistung. Mit diesen Kurven ist es möglich, für einen momentanen Leistungsbedarf das Emissionsaufkommen mittels Interpolation der Kurven zu approximieren. Die Verkehrssimulation (SUMO) liefert über eine Schnittstelle dazu Geschwindigkeit, Beschleunigung und Steigung der Strecke. Mit Hilfe dieser Werte kann der momentane Leistungsbedarf ausreichend exakt angenähert werden, wie in Abbildung 1 dargestellt.

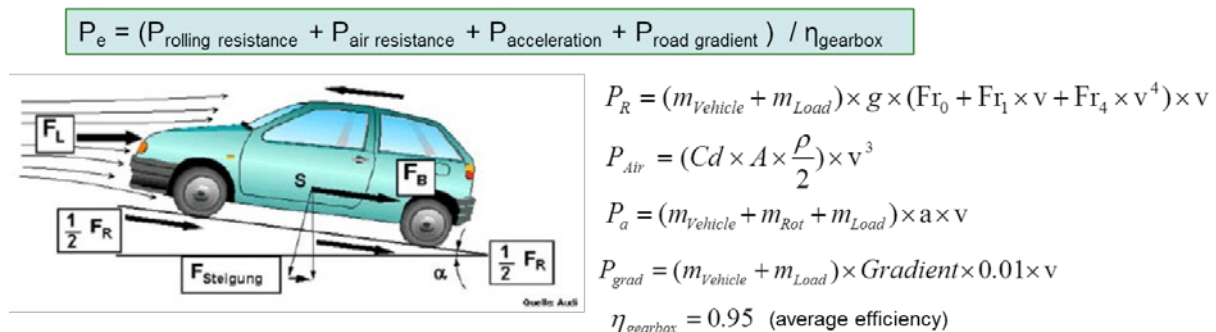


Abbildung 1: Leistungsberechnung PHEMlight

Zur Validierung des Modells wurden Fahrzeuge mit der Vollversion von PHEM sowie PHEMlight auf Zyklen, die das normale Fahren abbilden, z.B. ERMES Zyklus für PKWs und leichte Nutzfahrzeuge, ausgewertet. Die dabei erzielten Ergebnisse weisen auf eine ausreichend gute Annäherung der PHEM Vollversion hin, die natürlich ihrerseits ebenfalls eine Simulation ist und realen Schadstoffausstoß approximiert. Über die gesamte Zykluslänge (ERMES) wurde eine durchschnittliche Leistungsabweichung von ca. 2 % und eine durchschnittliche Abweichung des NO_x Ausstoßes von ca. 6 % erzielt.

2.3 Szenario Braunschweig

Aktuell verfügbare digitale Straßenkarten sind für eine mikroskopische Simulation oft zu ungenau. Eigenschaften von Straßen wie Spuranzahl oder Aufweitungen vor Kreuzungen müssen korrigiert bzw. ergänzt werden und Kreuzungen sind an die von der Simulation benötigte Auflösung anzupassen. Da solche Korrekturen für große Straßennetze sehr aufwendig sind, ist im Rahmen der Arbeiten ein vorhandenes Simulationsszenario der Stadt Braunschweig benutzt worden.

Das Szenario ist im Rahmen der Großforschungsanlage AIM [15] erstellt worden. Das Straßennetz wurde aus einer digitalen Straßenkarte der Firma Navteq importiert und anschließend korrigiert. Positionen der Lichtsignalanlagen (LSA) sind von der Bellis AG, die für das Verkehrsmanagement in Braunschweig verantwortlich ist, zur Verfügung gestellt und in das Simulationsszenario übernommen worden. Die realen LSA-Schaltpläne waren nicht verfügbar, die Pläne der simulierten LSAs sind daher nach bestem Wissen manuell angepasst worden. Abbildung 2 zeigt einige Haupteigenschaften des Simulationsnetzes. Das Simulationsnetz besteht aus 14.016 Knoten (in etwa Kreuzungen) und 31.316 Kanten (sie verbindenden Straßen) innerhalb einer Fläche von ca. 25 km * 25 km.

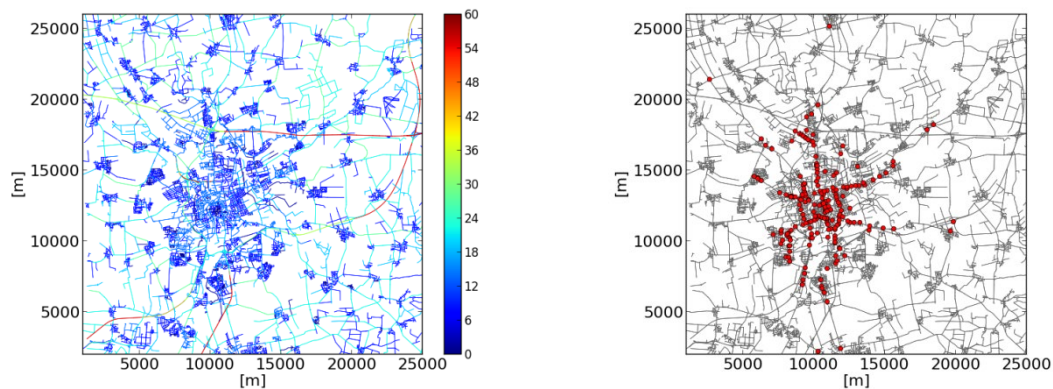


Abbildung 2: Das Netz des Simulationsszenarios; links: Darstellung der im Normalfall maximal erlaubten Geschwindigkeiten; rechts: LSA-Positionen

Die Nachfrage entstammt einer stundenfein aufgelösten Version des Verkehrsnachfragemodells „VALIDATE“ der Firma PTV Group [16]. Die verfügbaren Daten beinhalten Quelle/Ziel-Matrizen für die fünf typischen Wochentagsklassen, wobei in nachfolgenden Untersuchungen nur die Wochentagsklasse „Dienstag-Donnerstag“ zur Anwendung kommt. Es liegen gesonderte Matrizen für Personen- und Lastverkehr vor. In der aktuellen Version des Szenarios ist der öffentliche Personennahverkehr nicht abgebildet. Die Tagesganglinie wird in den Abbildungen 4 a) und b) dargestellt, die Verteilungen der Routenlängen und -dauern in Abbildungen 5 a) und b).

Auf die Fahrzeuge der Nachfrage ist die der HBEFA [17], [18] entnommene Verteilung aktueller Fahrzeugemissionsklassen abgebildet worden, unterschieden nach PKWs (15 Klassen) und LKWs, die letzteren in leichte (11 Klassen) und schwere Nutzfahrzeuge (7 Klassen) unterteilt.

3 Maßnahmen

3.1 Struktur der Datenquelle

Die MARLIS-Datenbank beinhaltet in der nachfolgend betrachteten Version 3.0 die Beschreibungen von 3.665 realen Maßnahmen zur Schadstoffminimierung, von denen 1.318 als realisiert gekennzeichnet sind. Neben in Deutschland durchgeführten Maßnahmen (3.297) finden sich auch Ansätze aus anderen europäischen Ländern sowie China, Indien, Kanada, Neuseeland und der Südafrikanischen Republik. Neben einer umgangssprachlichen Erläuterung werden für jede Maßnahme u. a. der räumliche/geographische Bereich innerhalb dessen sie realisiert worden ist angegeben, das Jahr der Realisierung, die Kosten der Realisierung unterteilt in vier Kategorien, sowie die angenommenen und tatsächlichen Auswirkungen der Maßnahme auf die Schadstoffemission und/oder -immission, wobei MARLIS die Schadstoffe NO_x und PM_x adressiert.

MARLIS nutzt mehrere Klassifikationsschemata, die bei der Suche als Filter genutzt werden können. Zu diesen gehören die durch die Maßnahme zu minimierenden Schadstoffe (NO_x/PM_x), die Umsetzbarkeit (kurz-, mittel-, langfristig), der Status der Umsetzung (bereits realisiert, in Planung, zurückgestellt, etc.), der Wirkungsbereich (strecken- oder gebietsbezogen), sowie das Land mit weiteren Unterteilungen in Bundesländer und Städte für Deutsch-

land. Ein weiteres Klassifikationsschema ist die „Kategorie“. Die Kategorien auf der oberen Ebene sind hierbei „Fahrzeugtechnik, Fuhrpark“, „Infrastruktur-, Baumaßnahmen“, „Verkehrslenkende Maßnahme, Verkehrsmanagement“, „ÖPNV“, „Rad- und Fußgängerverkehr“, „Verkehrsbeschränkungen“, „Verflüssigung“, „Ruhender Verkehr“, „Wirtschaftsverkehr“, „Öffentlichkeitsarbeit“, „sonstige Maßnahmen“. Zum Teil werden diese Kategorien innerhalb von MARLIS in weitere als „Unterpunkt“ bezeichneten Klassen unterteilt.

3.2 Modellierbarkeit der Maßnahmen

Nicht alle Maßnahmen können adäquat in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation modelliert werden. So zielen einige der Maßnahmen direkt auf eine Veränderung in der Verkehrsmittelwahl ab. Üblicherweise werden hierzu Modelle der Bevölkerung des simulierten Gebietes eingesetzt, die Entscheidungsmodelle für die Verkehrsmittelwahl beinhalten. Die Nutzung solcher Modelle fand im Rahmen dieser Arbeit nicht statt.

Einige Maßnahmen sind spezifisch auf ein bestimmtes Gebiet abzustimmen und verlangen genaues Wissen über dessen soziodemografischen oder verkehrlichen Eigenschaften. Zu solchen Maßnahmen gehören z.B. der Bau einer neuen Zufahrtstraße in ein Industriegebiet oder eines Radwegenetzes, Verkehrslenkung um eine Stelle oder ein Gebiet mit besonders hohen Immissionen, Einführung einer neuen ÖPNV-Linie, Auswahl von Orten für Verteilzentren, etc. Auf die Modellierung solcher Maßnahmen wurde aufgrund des hohen Aufwandes bei der Wahl geeigneter Szenarien verzichtet, obwohl solche Maßnahmen oft durch technisch unkomplizierte Änderungen im Simulationsnetz oder weiteren das Szenario beschreibenden Dateien nachgebildet werden könnten.

Tabelle 1 versucht die Modellierbarkeit von Szenarien, unterschieden nach ihrer Kategorie, darzustellen. Es sollte festgehalten werden, dass diese Zusammenfassung verallgemeinernd und nicht exakt ist. So kann z.B. jede Änderung im Verkehrsgeschehen einzelne Personen dazu motivieren, das benutzte Verkehrsmittel zu wechseln. Die Tabelle gibt nur wieder, welche Maßnahmen direkt auf die Verkehrsmittelwahl wirken.

Tabelle 1: Möglichkeiten und Einschränkungen der Modellierbarkeit von Maßnahmen mithilfe mikroskopischer Simulationen

	Mikroskopisch modellierbar	Benötigt spezifisches Wissen	Benötigt Verkehrsmittelwahl
Fahrzeugtechnik, Fuhrpark	x	x (Fahrzeugflotte)	
Infrastruktur-, Baumaßnahmen	x	x	
Verkehrslenkende Maßnahme, Verkehrsmanagement	x	x	
ÖPNV	(1)	x	x
Rad- und Fußgängerverkehr	(2)	x	x
Verkehrsbeschränkungen	x	(3)	
Verflüssigung	x	x	
Ruhender Verkehr	(4)	x	
Wirtschaftsverkehr	(5)	x	
sonstige Maßnahmen	(5)		

(1): In dem benutzten Szenario ist der ÖPNV nicht umgesetzt.

(2): Fußgänger sowie Fahrradfahrer wurden von SUMO zu dem Zeitpunkt nicht unterstützt.

(3): Hier könnte zwischen Eingriffen in einzelne Straßen(-abschnitte) und Maßnahmen, die große Gebiete betreffen, unterschieden werden. Die ersten verlangen genaues Wissen über das Straßennetz. Zu Maßnahmen, die große Gebiete umfassen, gehören z.B. Umweltzonen. Die Begrenzung solcher Zonen orientiert sich oft an bereits vorhandenen Strukturen, wie z.B. einem Stadtring. Diese Strukturen liegen zumeist in verwertbarer digitaler Form vor und können so schnell für Anpassungen eines Szenarios herangezogen werden.

(4): Ruhender Verkehr ist in Verkehrsflusssimulationen zumeist nicht abgebildet.

(5): Diese Kategorie kann aufgrund der Heterogenität der in ihr enthaltenen Maßnahmen nicht pauschal eingeordnet werden.

3.3 Auswahl

Ausgehend von der Untersuchung zur Modellierbarkeit von Maßnahmen sind zunächst Begriffe bestimmt worden, die für die Maßnahmen typisch sind, die schlecht oder gar nicht umgesetzt werden konnten. Diese Begriffe sind benutzt worden um Maßnahmen der MARLIS-Datenbank automatisch auszusondern. Die verbleibenden, einfach zu modellierenden 381 Maßnahmen gliedern sich grob in Geschwindigkeitsbegrenzungen, Verkehrsbeschränkungen sowie Umweltzonen.

Auf dieser Gliederung aufbauend sind drei Maßnahmen für die Umsetzung ausgewählt worden: die Einführung von Tempo-30-Zonen (Geschwindigkeitsbegrenzungen) sowie die Einführung von zwei Varianten einer Umweltzone, einer „permissiven“, in der Dieselfahrzeuge unterhalb der Euro-Norm 2 (ohne Partikelfilter) verboten sind, sowie einer "restriktiven", in der Benzinfahrzeuge mit Katalysator sowie Dieselfahrzeuge ab Euro-Norm 4 (oder Norm 3 mit Partikelfilter) zugelassen sind.

3.4 Umsetzung in der Simulation

Bewohnte Gebiete sind anhand von Kennzeichnungen bestimmt worden, die der digitalen Karte OpenStreetMap [19] entnommen worden sind. Für alle Kanten des Straßennetzes, die innerhalb dieser Gebiete liegen und Geschwindigkeiten über 30 km/h erlauben, ist die erlaubte Geschwindigkeit auf 30 km/h gesetzt worden. Abbildung 3 (links) zeigt alle innerhalb des Straßennetzes veränderten Kanten. Abbildung 3 (Mitte) stellt vergrößert die Auswahl innerhalb des Stadtzentrums dar.

Die Umweltzonen sind zunächst im benutzten Simulationsnetz umgesetzt worden. Die aus der Navteq-Grundlage importierten Angaben über erlaubte Fahrzeugklassen (wie „Taxi“, „PKW“, „Fußgänger“, etc.) sind so verändert worden, dass sowohl die Sperrung nach innerhalb der Umweltzone erlaubten Emissionsklassen als auch die Sperrung bestimmter Straßen für Schwerlastverkehr berücksichtigt werden.

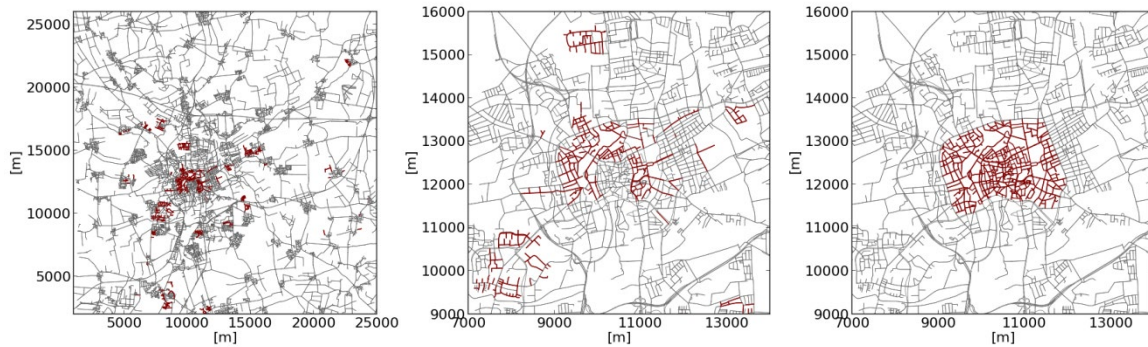


Abbildung 3: Ausgewählte Straßen (rot) für Tempo-30-Zonen (links, Mitte) und Umweltzonen (rechts)

Im zweiten Schritt sind die benutzten Nachfragedaten für die jeweilige Simulation der Maßnahme vorbereitet worden. Anhand ihrer Emissionsklasse wurden hierfür Fahrzeuge den auf Kanten des Simulationsnetzes erlaubten/verbotenen Fahrzeugklassen zugeordnet. Danach wurden die Routen von Fahrzeugen, die die Umweltzone nicht befahren dürfen, an die neuen Fahrbeschränkungen angepasst. Routen, die in der Umweltzone enden oder beginnen sind an der Grenze der Umweltzone beschnitten worden. Routen, die komplett in der Umweltzone lagen, sind entfernt worden. Für alle Maßnahmen ist anschließend ein neues Nutzergleichgewicht errechnet worden.

4 Ergebnisse

Im Folgenden wird versucht, die Ergebnisse kurz vorzustellen und zu interpretieren. Zunächst werden dabei allgemeine, das gesamte Szenario umfassende, Kennwerte vorgestellt. Vorab muss bemerkt werden, dass diese aufgrund der Szenariogröße die Auswirkungen der Maßnahmen unzureichend wiedergeben. Danach werden Besonderheiten der jeweiligen Maßnahmen besprochen.

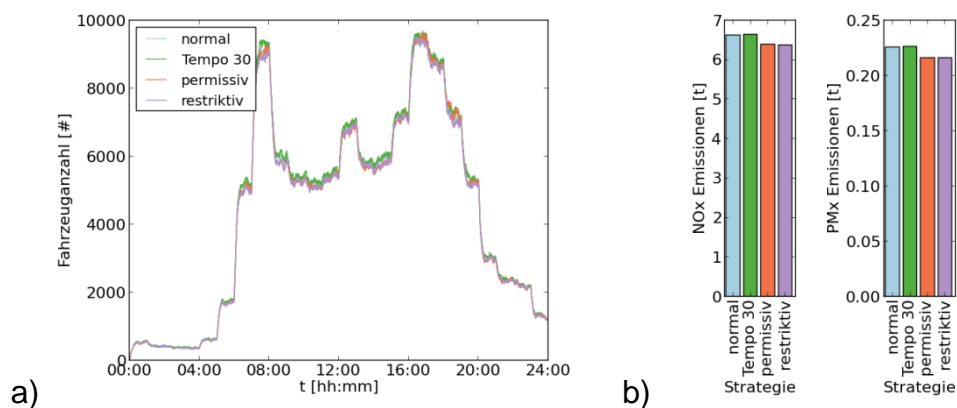


Abbildung 4: a) Verläufe der Fahrzeuganzahl über die Zeit; b) Gesamtausstoß NO_x und PM_x der untersuchten Maßnahmen

Die in Abbildung 4 a) gezeigte Tagesganglinie der sich jeweils gleichzeitig im Netz befindenden Fahrzeuge zeigt, dass sich insb. ab der Morgenspitze bis zum Ende der Abendspitze innerhalb des Tempo-30-Szenarios mehr Fahrzeuge im Straßennetz befinden als im Ver-

gleichsfall. Auch sind hier leicht höhere Emissionen erkennbar (Abbildung 4 b). Beide eine Umweltzone abbildenden Szenarien zeigen eine Reduktion der Schadstoffe.

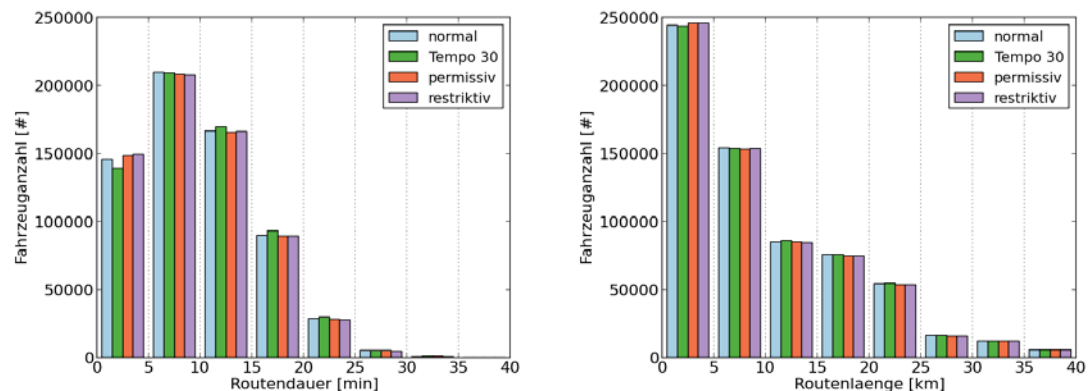


Abbildung 5: Verteilungen der Routendauern (links) und Routenlängen (rechts)

Die Nachfolgenden Vergleichsabbildungen zeigen stets die Differenz „Mit-Maßnahme – Ohne-Maßnahme“. Wie in Abbildung 6 zu sehen, verlagert sich der Verkehr von den Tempo-30-Straßen weg hin zu den sie umgebenden Straßen. Die Emissionen verhalten sich entsprechend – während die Tempo-30-Zonen von der Maßnahme profitieren, werden umliegende Straßen belastet.

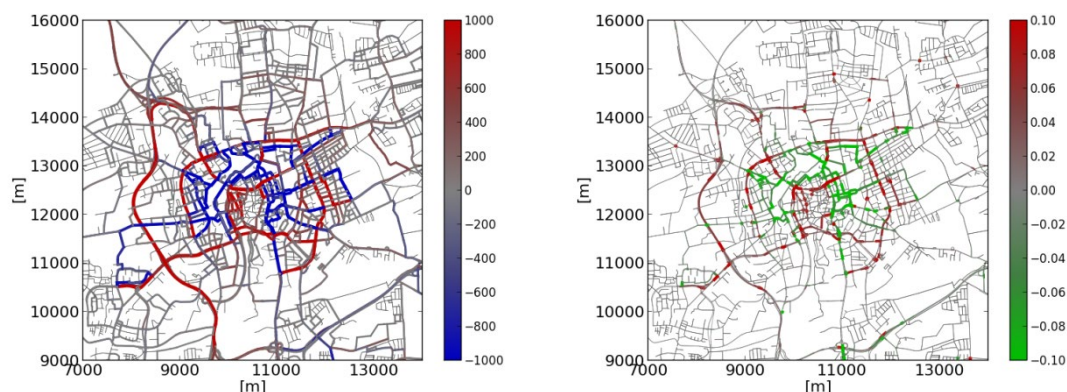


Abbildung 6: Veränderungen in der Straßennutzung (links, in Fahrzeugen über den Tag) und dem NOx-Ausstoß (rechts, in mg/m über den Tag) bei einer Umsetzung der Tempo-30-Zonen

Im Vergleich zu den Tempo-30-Zonen sind die Auswirkungen beider Umweltzonen großflächiger (siehe Abbildung 7) und schwieriger zu interpretieren. Es zeigt sich eine Entlastung des Verkehrs auf den die Umweltzone querenden Straßen, sowie den diese Straßen bedienenden Autobahnen. Die zusätzliche Belastung des die Umweltzone umgebenden Straßenrings fällt geringer aus als im Fall der Tempo-30-Zonen. Beide umgesetzten Umweltzonen verhalten sich dabei qualitativ ähnlich, die Unterschiede sind quantitativ.

Eine genauere Betrachtung der Auswirkungen kann nur erfolgen, wenn die Einflüsse der verschiedenen Nachfragegruppen individuell betrachtet werden. Eine solche Untersuchung ist anhand der verfügbaren Ergebnisse möglich, kann im Rahmen dieses Berichts aber nicht erfolgen.

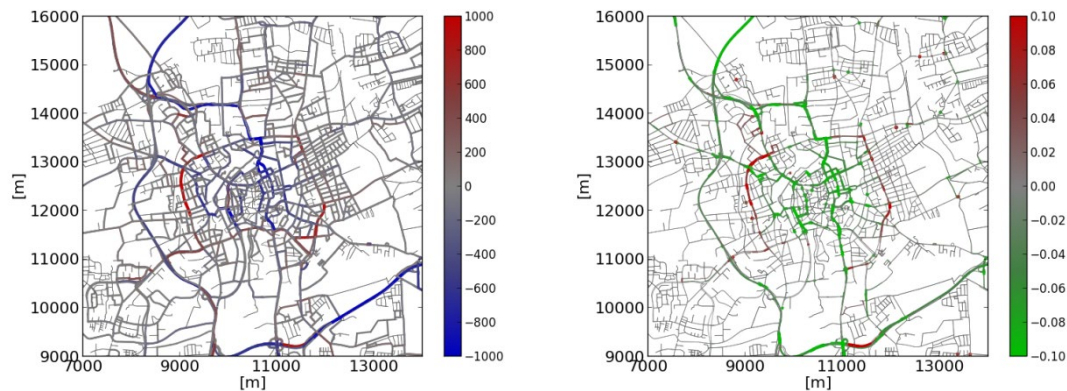


Abbildung 7: Veränderungen in der Straßennutzung (links, in Fahrzeugen über den Tag) und dem NOx-Ausstoß (rechts, in mg/m über den Tag) bei einer Umsetzung der Umweltzonen

5 Diskussion und Zusammenfassung

Es wurde eine Untersuchung zur Simulation realer Verkehrsmanagementmaßnahmen zur Luftreinhaltung mittels einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation wiedergegeben. Die Untersuchung nutzt die MARLIS-Datenbank als Quelle für reale Verkehrsmanagementmaßnahmen zur Luftreinhaltung, bespricht die Möglichkeiten und Einschränkungen ihrer Umsetzung in einer mikroskopischen Simulation sowie die Auswahl der danach exemplarisch umgesetzten Maßnahmen. Die Auswertungen der so erhaltenen Veränderungen in der Straßennutzung und somit dem Emissionsverhalten wurden knapp wiedergegeben.

Die Umsetzung innerhalb der benutzten Werkzeuge „SUMO“ und „PHEMlight“ sowie die anschließenden Auswertungen zeigen die große Vielfalt an Betrachtungen, die eine mikroskopische Modellierung solcher Maßnahmen ermöglicht. Gleichzeitig zeigen sie jedoch auch die Komplexität des Themas auf. Fast alle der durchgeführten Arbeitsschritte könnten vertieft werden. Viele der in MARLIS gelisteten Maßnahmen zielen auf eine Veränderung in der Verkehrsmittelwahl ab oder beeinflussen diese. Um auch diese untersuchen zu können, muss die Simulationsumgebung um entsprechende Modelle erweitert werden.

In den nächsten Schritten sollte jedoch die Auswertung der zeitlich-räumlichen Änderungen im Fokus stehen, um die Auswirkungen der Maßnahmen besser verstehen und vorhersagen zu können.

6 Danksagungen

Die Autoren möchten sich bei der Europäischen Kommission für die Kofinanzierung des Projektes „COLOMBO“ sowie der Helmholtz-Gemeinschaft und dem Land Niedersachsen für die Unterstützung der Großforschungsanlage „AIM“ bedanken.

7 Literatur

[1] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union. (2008): *Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa*, <http://eur->

lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0050:DE:NOT,
06.02.2014.

[2] BAST (2012): *MARLIS - Datenbank mit Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft in Bezug auf Immissionen an Straßen, Version 3.1*, http://www.bast.de/nn_42544/DE/Publikationen/Datenbanken/MARLIS/MARLIS.html, 06.02.2014.

[3] AVISO GmbH. (2012): *Kurzinformation zur aktuellen MARLIS Version 3.0*, MARLIS Version 3.0 beiliegend.

[4] Josep Tomàs Vergés. (2013): *Analysis and simulation of traffic management actions for traffic emission reduction*, MARLIS Masterarbeit, TU Berlin.

[5] Krajewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., Bieker, L.. (2012): *Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility*, In: International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5, Seiten 128-138.

[6] DLR (2013): *Internetseiten der Verkehrsflusssimulation SUMO*, <http://sumo-sim.org/>, 06.02.2014.

[7] Krauß, S. (1998): *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Doktorarbeit, Universität zu Köln.

[8] Krajewicz, D., Erdmann, J. (2013): *Road Intersection Model in SUMO*, In: *1st SUMO User Conference - SUMO 2013*, Seiten 212-220, DLR, Berlin, ISSN 1866-721X.

[9] Krajewicz, D. (2010): *Traffic Simulation with SUMO - Simulation of Urban Mobility*, In: Barceló, J.: *Fundamentals of Traffic Simulation*, International Series in Operations Research and Management Science. Springer, Seiten. 269–294, ISBN 978-1-4419-6141-9. ISSN 0884-8289.

[10] Krajewicz, D. und andere (2013): *COLOMBO: Investigating the Potential of V2X for Traffic Management Purposes assuming low penetration Rates.*, In: ITS Europe 2013, Dublin.

[11] COLOMBO Konsortium (2013): *Internetseiten des Projektes COLOMBO*, <http://colombo-fp7.eu/>, 06.02.2014.

[12] Furian, N., Hausberger, S., Krajewicz, D. (2013): *COLOMBO: Deliverable 4.1 - Extended Simulation Tool PHEM coupled to SUMO with User Guide (Draft)*, als download über [11] verfügbar.

[13] Hausberger, S., Rexeis, M., Zallinger, M., Luz, R.(2009): *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*, Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679

- [14] Technische Universität Graz (2013): *Internetseiten des Instituts für Verbrennungsmaschinen und Thermodynamik (inklusive PHEM)*, <http://www.ivt.tugraz.at/de/forschung/emissionen.html/>, 06.02.2014.
- [15] Schnieder, L., Lemmer, K. (2012): *Anwendungsplattform Intelligente Mobilität - eine Plattform für die verkehrswissenschaftliche Forschung und die Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste*, In: Internationales Verkehrswesen (04/2012), Seiten 62-63, DVV Media Group GmbH, ISSN 0020-9511.
- [16] PTV Group (2013): *Internetauftritt der PTV Group*, <http://www.ptvgroup.com/>, 06.02.2014.
- [17] Knörr W., Hausberger S. (2011): *Weiterentwicklung der Emissionsfaktoren für das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA)*, FKZ 370 952 142, Endbericht, Im Auftrag des Umweltbundesamtes; Heidelberg.
- [18] INFRAS (2013): *Handbuch für Emissionsfaktoren*, <http://www.hbefa.net/>, 06.02.2014
- [19] OpenStreetMap Projekt (2013): *Internetseiten des OpenStreetMap Projektes*, <http://www.openstreetmap.org/>, 06.02.2014
- [20] Krajewicz, D., Flötteröd, Y.-P. (2013): *Simulative Untersuchung abstrakter und realer Verkehrsmanagementansätze zur Emissionsreduktion*, In: Kolloquium Luftqualität an Straßen 2013, Seiten 42-57. Bundesanstalt für Straßenwesen. Kolloquium "Luftqualität an Straßen 2013", Bergisch Gladbach.